

cristales líquidos

bases de su comportamiento (I)

En este primer artículo, de una serie de tres, se presentan las diferentes clases de cristales líquidos existentes, así como las configuraciones más usuales de trabajo. Se presentan algunas formas de fabricación de células y se dan las bases físicas de su comportamiento óptico, eléctrico y magnético. Finalmente se ofrece una panorámica global de sus principales aplicaciones

J.A. Martín-Pereda, J.M. Otón y M.A. Muriel

LIQUID CRYSTALS

The basics of their behaviour (first part)

In this paper, first in a series of three, the different liquid crystal types are presented. Usual configurations, cells manufacturing and physical principles for their optical, electrical and magnetic behaviour are given. A general perspective of the main applications closes the paper.

INTRODUCCION

El estado de la materia conocido en nuestros días como cristalino líquido, y del que sus miembros se conocen como cristales líquidos, fue descubierto en 1888 por el botánico austriaco F. Reinitzer recibiendo, en 1889, el nombre con el que hoy se les conoce y que les fue asignado por el físico alemán O. Lehmann. Aunque en algún momento se les consideró como curiosidades de laboratorio, los cristales líquidos son bastante comunes. De hecho se estima que uno de cada doscientos materiales orgánicos ofrece un comportamiento de este tipo. El interés en su estudio fue creciendo muy lentamente desde Reinitzer hasta aproximadamente 1893, fecha en que casi pasaron al olvido. Mas al comienzo de la década de los 60, el interés se revitalizó. Ello fue debido a un doble motivo. Por una parte, el extraordinariamente complejo comportamiento físico-químico que presentan, hace de ellos candidatos idóneos para el estudio de las transiciones de fase y de otra serie muy apreciable de fenómenos críticos. Por otra, y esta es la que aquí nos interesa, el gran número de aplicaciones prácticas que han encontrado, ha hecho que su presencia dentro del campo de los dispositivos sea tan fundamental en ciertos terrenos como la de algunos de estado sólido. Como consecuencia, su estudio se ha incrementado de forma notoria en los últimos años y de los muy contados pequeños grupos que hace no más de quince años se dedicaban a ellos, se ha pasado en la actualidad a varios cientos repartidos por todo el mundo, con institutos de investigación dedicados a la búsqueda de nuevos fenómenos o nuevas aplicaciones.

En el presente trabajo, que será desarrollado en una pequeña serie de tres artículos de la que éste es el primero, se expondrá una síntesis de cuáles son los principios físicos en que se basa su comportamiento, cuáles son las aplicaciones

más significativas que se han desarrollado y cuáles son los futuros caminos que para ellos se prevén. A tal fin nos basaremos esencialmente, en los trabajos que sobre ellos ha desarrollado el grupo de Electrónica Cuántica de la ETS de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid durante los últimos seis años y que se han traducido en una serie de artículos y ponencias en congresos nacionales y extranjeros, algunos de los cuales aparecerán en la bibliografía adjunta. Igualmente, se presentarán algunos desarrollos de otros grupos que se considera son de interés esencial para su comprensión. En algunos casos se plantearán problemas aún no resueltos ya que se encuentran todavía en fase de experimentación.

En este primer artículo, se presentarán los diferentes tipos de cristales líquidos existentes y cuáles son sus propiedades físicas. Se verán sus potenciales usos y qué tipo de dispositivos pueden generar en un futuro no muy lejano.

En el segundo, el interés se centrará en los cristales líquidos nemáticos y, en concreto, en las estructuras torsionadas, base de los visualizadores digitales, de uso tan extendido en nuestros días. Se analizarán su comportamiento dinámico y sus propiedades electroópticas. Se presentarán, asimismo, algunos otros dispositivos basados en ellos, como son deflectores, moduladores y conmutadores de haces láser.

Finalmente, en el tercer artículo se ofrecerá una perspectiva lo más amplia posible de aquellas aplicaciones que aún no han llegado al uso común pero que parece puedan serlo en la presente década. Su empleo en dispositivos bistables ópticos y sus propiedades optoópticas será presentado como colofón final de esta panorámica.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS CRISTALES LIQUIDOS. DIFERENTES TIPOS

La experiencia habitual supone en la mayoría de las sustancias transiciones desde estado sólido a líquido, que tienen lugar a temperaturas perfectamente determinadas y de una forma prácticamente abrupta. El paso de hielo, a 0°C, a agua líquida, es quizás el más usual de todos los cambios de estado. Sin embargo, este hecho no es general en muchos materiales orgánicos. En algunos de ellos aparece más de una transformación que da lugar a la existencia de un estado intermedio. Estos estados, debido a este hecho, han recibido el nombre de «mesofases» teniendo propiedades

intermedias entre las de los líquidos y los sólidos. Su apariencia externa es la de un líquido viscoso que presenta un orden molecular de rango próximo al de los cristales. Este ordenamiento de las moléculas en una mesofase cualquiera puede ser de tipo translacional, rotacional o de ambos. De acuerdo con el tipo de orden, según se verá más adelante, pueden efectuarse diferentes clasificaciones. Pero el hecho derivado de este orden es que, si existe, deberá ser debido a la forma especial que presentan las moléculas y a su disposición geométrica. La primera razón, la de la forma de las moléculas, se basa en el hecho de su composición básica. Las características moleculares generales que se encuentran en los compuestos que pueden tener comportamiento de cristal líquido se suman en las siguientes:

- Las moléculas son elongadas y rectilíneas. Si la molécula presenta segmentos «planos», por ejemplo, anillos de benceno, la cristalinidad líquida aparece reforzada.
- Las moléculas son «rígidas» según su eje mayor; los enlaces dobles son muy comunes según dicho eje de la molécula.
- Parece importante la existencia simultánea de dipolos y grupos polarizables en las moléculas. Los efectos más pronunciados aparecen preferentemente si el dipolo aparece según el eje molecular.

Un esquema simplificado de una molécula típica aparece en la figura 1.

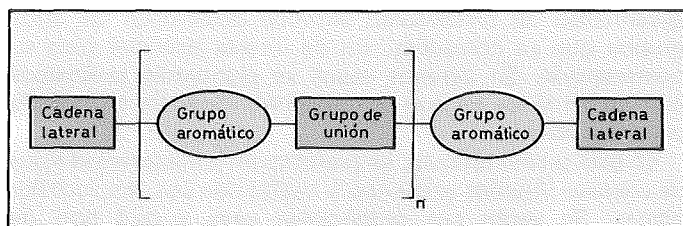


Figura 1. Esquema típico de una molécula de cristal líquido.

Todo lo anterior puede resumirse en el hecho de la existencia de una muy fuerte anisotropía en la mayoría de las propiedades físicas que ofrecen, tanto desde un punto de vista micro, como macroscópico. El tamaño medio de la molécula puede ser del orden de 20 Å o más de longitud y 5 Å de diámetro.

Según el tipo de molécula, una misma sustancia puede pasar, como se ha dicho antes, por distintas transformaciones mesomórficas entre el punto de fusión y el punto de transición a la fase de líquido isotrópico. Estas transformaciones pueden ser enantiotrópicas o monotrópicas y pueden ser inducidas por dos tipos de fenómenos. Esto da lugar a una primera división en dos grandes grupos:

- Los termotrópicos, en los que la transformación es provocada por variaciones de la temperatura. Su estudio es muy importante ya que, aparte de su interés intrínseco en investigación básica, dan lugar a una amplia serie de aplicaciones electroópticas, objeto del presente trabajo y a medidores de temperatura y de presión entre otros.
- Los liotrópicos, en los que el mesomorfismo tienen lugar para unas ciertas concentraciones de un soluto en un disolvente. Son de un gran interés biológico por el importante papel que parecen jugar en los sistemas vivos. Por ejemplo, las membranas de las células vivas pueden pertenecer a este grupo.

Nuestro interés se centrará en los primeros, por lo que, de una manera amplia podemos pasar ya a su estudio.

Siguiendo la nomenclatura propuesta por Friedel en 1922, y que se basó esencialmente en razones de simetría, los cristales líquidos termotrópicos pueden clasificarse en tres tipos: nemáticos, colestéricos y esmécticos. Esta clasificación no quiere decir que cada compuesto se encuadre necesariamente dentro de uno sólo de los anteriores tipos. De hecho, un mismo compuesto o sustancia puede presentar más de un estado, dependiendo de la temperatura en que se encuentre. Una vez que hayamos visto con algún mayor detalle las características de los diferentes tipos, se presentarán cuáles son las relaciones que existen entre los diferentes estados.

Cristales líquidos nemáticos

El orden molecular característico de este grupo aparece esquematizado en la figura 2. Los dos hechos básicos que se aprecian inmediatamente son:

- Existe un orden orientacional de gran alcance, esto es, las moléculas tienden a orientarse paralelamente entre sí.
- La fase nemática es fluida, es decir, no existe una correlación de gran alcance entre las posiciones de los centros de gravedad de las moléculas.

En estado de equilibrio térmico, la fase nemática constituye un medio ópticamente uniaxial que se caracteriza por un eje principal n . De una forma aproximada, su posicionado geométrico podría semejar al de las cerillas que se introducen aleatoriamente en una caja de dimensión mayor que el tamaño de la cerilla: todas apuntarían en la

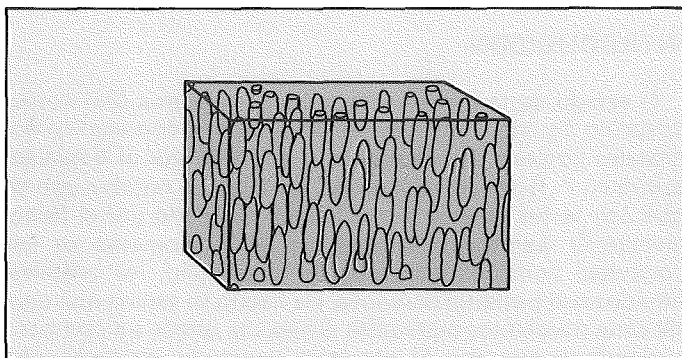


Figura 2. Orden molecular característico de los cristales líquidos nemáticos.

misma dirección aunque sus cabezas se encontrasen en diferentes posiciones.

Lo anterior no quiere decir, evidentemente que en un gran volumen, varios órdenes de magnitud mayor que el del tamaño de las moléculas, todas las moléculas verifiquen la antedicha orientación única. El hecho real que aparece es el de que la situación es análoga a la de un material ferromagnético en condiciones de no imantación preferencial. En él, como ya es sabido, existen un conjunto de dominios, cada uno con dirección de polarización única, pero entre los cuales no existe ningún tipo de correlación. Es necesaria una influencia externa para que todos los dominios existentes puedan adoptar la misma orientación. En el caso de los cristales líquidos, esta influencia puede ser debida a factores mecánicos, o químicos, como se verá en el caso de alineamiento con respecto a las paredes del recipiente que los contiene, o a la acción de campos eléctricos o magnéticos, como se aplicará para dispositivos de visualización. Estos hechos son comunes tanto para el

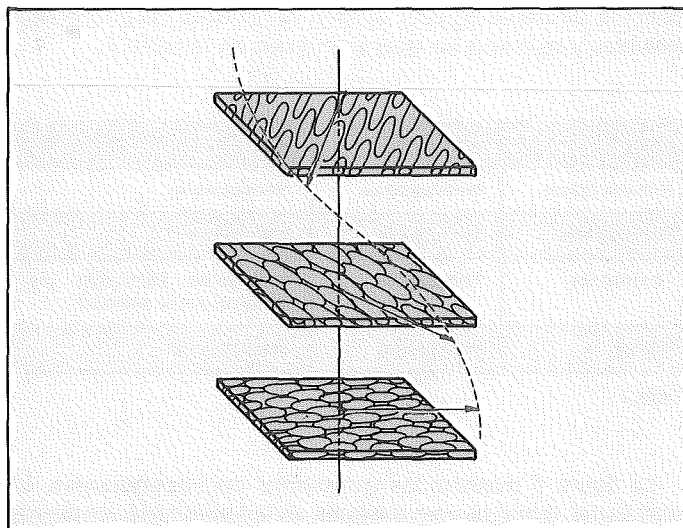


Figura 3. Orden molecular característico de los cristales líquidos colestéricos.

caso de los nemáticos, que se trata aquí, como para el de los colestéricos y esmécticos, que se verán a continuación.

Cristales líquidos colestéricos

La figura 3 muestra la estructura en equilibrio de la fase colestérica. Al igual que ocurría en el caso de los nemáticos, la ausencia de un orden translacional de gran alcance hace que presenten una cierta fluidez. A pequeña escala, es evidente que ambos tipos de cristales líquidos son similares. La diferencia se presenta a gran escala, y el efecto básico que los diferencia es que los colestéricos están compuestos de moléculas ópticamente activas. El resultado es que muestran un eje helicoidal perpendicular al de la dirección molecular preferente. El vector que define la posición de las moléculas n , viene así definido por unas ecuaciones del tipo

$$n_x = \cos(q_0 z + \Phi)$$

$$n_y = \sin(q_0 z + \Phi)$$

$$n_z = 0$$

donde tanto la dirección del eje helicoidal, z , como la magnitud del ángulo de fase Φ son arbitrarios. En consecuencia, la estructura de un colestérico es periódica con un período espacial dado por

$$L = \pi/q_0$$

y donde el signo de q_0 diferencia el que la hélice sea dextrógira o levógira. Cuando L es del orden de las longitudes de onda correspondientes a la zona del visible, la periodicidad existente da lugar a una fuerte dispersión de la luz, del tipo conocido como de Bragg, que confiere a estos cristales una apariencia muy diversificada por los diferentes colores que muestra.

Como puede verse fácilmente, para $q_0 = 0$, lo que implica un paso infinito de la hélice, los colestéricos se convierten en nemáticos, por lo que ambos pueden considerarse dos subclases de una misma familia.

Cristales líquidos esmécticos

Así como en los dos anteriores tipos, sólo existía una fase

que los caracterizaba, en el caso de los esmécticos se han llegado a encontrar hasta ocho fases diferentes. Como, de hecho, sólo tres han sido plenamente identificadas serán únicamente estas tres las que presentaremos aquí. Son las que se conocen por los nombres de fases esmécticas A, B y C. Todos ellos tienen en común el hecho de aparecer en configuraciones estratificadas (figura 4). La diferencia que

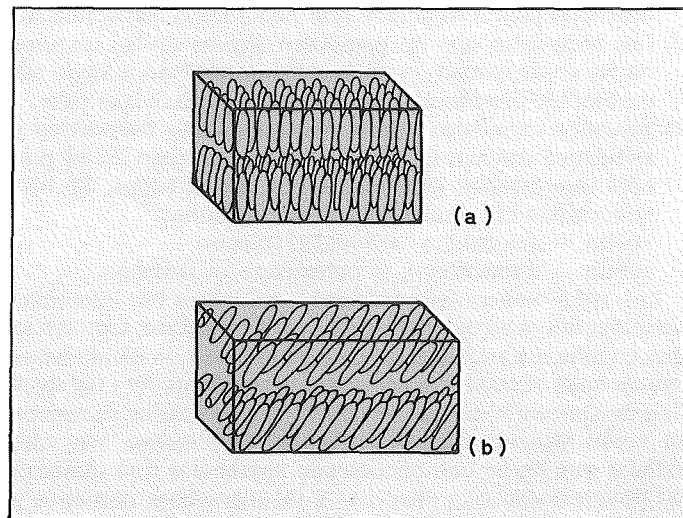


Figura 4. Orden molecular característico de los cristales líquidos esmécticos. a) tipo A; b) tipo B.

los separa es la disposición molecular en cada uno de los estratos. En el esméctico tipo A (figura 4a) las moléculas se encuentran todas ellas en posiciones con sus ejes principales, perpendiculares al plano que las contiene, aunque sus centros se encuentran irregularmente distribuidos sobre él. La anchura de esta capa es del orden de la longitud de la molécula, esto es, de unos 20-25 Å. Las fuerzas de interacción entre capas son bastante pequeñas, por lo que tienen una gran capacidad de deslizarse unas sobre otras. A pesar de ello, su viscosidad es bastante mayor que en el caso de las dos fases anteriores.

El orden correspondiente a un esméctico tipo C se muestra en la figura 4b. La anchura de cada estrato es aquí algo menor, lo que se deriva de que las moléculas que están en él contenidas se encuentran ligeramente inclinadas con respecto a la normal al plano. Se han encontrado sustancias en las que este ángulo puede llegar a 45°, y otras en la que éste depende de la temperatura.

Finalmente, los esmécticos B se diferencian de los A en que los centros de las moléculas en cada capa se encuentran formando conjuntos aproximadamente hexagonales. Debido a ello, este tipo ya no presenta la fluidez de los anteriores, lo que hace que sus propiedades mecánicas sean muy diferentes, aunque, en ningún caso, similares a las de los sólidos convencionales. De hecho algunas veces se ha designado a los cristales líquidos de este tipo como cristales plásticos.

Polimorfismo en cristales líquidos termotrópicos

Los anteriores tipos de mesofases presentadas no son, en modo alguno, independientes entre sí. De hecho, una gran cantidad de sustancias, en el intervalo de temperaturas existente entre las fases sólida y líquida, presentan dos o más tipos diferentes. Un análisis de las transformaciones existen-

tes da los siguientes datos de carácter general:

- Si una sustancia presenta fases nemática y esmética, la nemática es la que se encuentra a temperatura más alta.
- Si presenta tres diferentes tipos de esméticos, el orden es:
líquido isotrópico → nemático → esmético A → esmético C → esmético B → sólido
en el sentido de temperaturas decrecientes.
- Los compuestos con textura de esmético C puede mostrarla sola o mezclada con nemática o esmética A.
- Los materiales que no presentan alguna de las texturas dadas en b), tienen un polimorfismo análogo al dado allí y obtenido simplemente suprimiendo la fase que falta.
- Aquellos materiales que tienen mesofases colestérica y esmética ofrecen un orden análogo al dado en b) con sólo intercambiar «nemático» por «colestérico». Se han encontrado las siguientes transformaciones:
sólido → colestérico → líquido isotrópico
sólido → esmético A → colestérico → isotrópico.

Las anteriores transformaciones, así como los intervalos de temperatura en que tiene lugar cada mesofase, tanto en lo que se refiere a amplitud como a situación, son características de cada sustancia y determinan grandemente cuál es el tipo de aplicación en que se utilizan. En apartados sucesivos se verán algunos de estos hechos. Finalmente, hay que señalar que no se han encontrado sustancias que ofrezcan un polimorfismo que relacione a las mesofases nemática y colestérica. Naturalmente, la presencia de un campo eléctrico o magnético puede dar lugar a que un colestérico adopte una estructura nemática. Este tipo de distorsiones estructurales han sido ampliamente estudiadas en la literatura.

CONSTRUCCION DE LAS MUESTRAS DE CRISTAL LIQUIDO

Como ya ha sido comentado anteriormente, un cierto volumen de cristal líquido no se orienta todo él conforme a una única dirección, sino que lo hace según pequeños dominios, alineados cada uno según una diferente. Para las aplicaciones prácticas, que se verán en los siguientes artículos, es necesario que la muestra empleada esté toda ella orientada de igual forma. Es pues necesario adecuar una serie de técnicas que lleven a este resultado. En la literatura de los cristales líquidos existen muy diferentes métodos que conducen, de manera más o menos regular, a alineamientos adecuados. En este artículo se detallarán los que nuestro grupo ha empleado de forma más habitual y que, después de rechazados otros, han dado mejores resultados. Se darán algunos detalles prácticos, no referenciados en la literatura, y que han sido fruto de varios años de prueba. Aunque de forma usual, hagamos mención a los nemáticos, pueden emplearse técnicas muy similares con los restantes. Igualmente nos centraremos en las muestras planas, por su interés práctico. Otras configuraciones geométricas reciben igual tratamiento.

Las muestras planas pueden tener dos diferentes condiciones de contorno en la interfase vidrio soporte-cristal líquido. Son las que se conocen como alineamiento homeotrópico, donde en el eje largo de la molécula está situado perpendicularmente a la superficie, y el alineamiento homogéneo, en el que las moléculas descansan paralelas a la superficie del cristal y alineadas todas ellas en la misma dirección.

Como las células de cristal líquido, habitualmente empleadas, constan de dos láminas de vidrio entre las que se sitúa la

película de cristal líquido, existen varios tipos de geometrías posibles y que son las que se indican en la tabla 1.

Muestras	Superficie 1	Superficie 2
Homeotrópicas	homeotrópica	homeotrópica
Homogéneas	homogénea	homogénea
Torsionadas	homogénea	homogénea (dirección perpendicular a la anterior)
Mixtas	homogénea	homeotrópica

Tabla 1.

La figura 5 muestra las geometrías correspondientes. La más usual, como se verá después, es la torsionada, empleada para dispositivos de visualización. Las otras configuraciones ofrecen una serie de ventajas apreciables en algunos tipos de dispositivos de uso no general que serán presentados en el siguiente artículo.

Una vez vistas las configuraciones más usuales vamos a proceder a ver algunos de los métodos más empleados para su construcción y comprobación. En cada caso, el objetivo final será la obtención de una amplia zona constituida por un único dominio, esto es, con todas las moléculas orientadas de igual forma. Y para ello, el método a emplear será el tratamiento de las superficies del vidrio, de tal manera, que se fuerce a las moléculas de cristal líquido que estén en contacto con él, a que adopten una determinada orientación. Esta primera capa de moléculas inducirá a su vez a orientar a las situadas sobre ellas y así sucesivamente hasta una cierta distancia, que se suele denominar longitud de coherencia.

De acuerdo con lo anterior, es esencial la forma de tratar las superficies para lograr una cierta orientación de las moléculas. Y para ello la etapa inicial es la de una escrupulosa limpieza de tipo mecánico de dichas superficies mediante un material blando que no raye ayudado de un detergente especial (por ejemplo del tipo DECON, solución al 4 % v/v). El enjuague posterior se realiza con agua bidestilada y si es preciso guardarlas hasta su uso, deberá hacerse en un recipiente con alcohol etílico absoluto. A partir de aquí, el procedimiento dependerá de cuál es la configuración a obtener.

Si la configuración a obtener es del tipo homogéneo, el

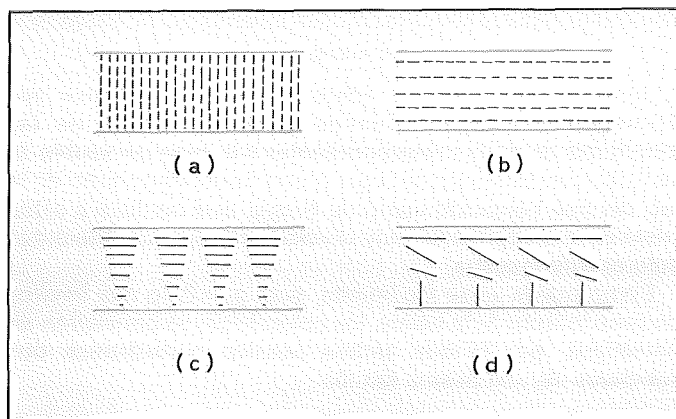


Figura 5. Esquema de las configuraciones de células planas de cristal líquido, más usuales: (a) homeotrópica, (b) homogénea, (c) torsionada y (d) mixta.

tratamiento más usual consiste en un frotamiento mecánico de la superficie con una gamuza o similar, en la dirección en la que se desea que las moléculas queden orientadas. La acción de alineamiento parece se debe a la producción de surcos microscópicos en la superficie del vidrio que inducen la orientación de las moléculas. Para obtener grandes zonas de dirección única es preciso un frotamiento muy cuidado, lo que sólo se puede hacer mediante una máquina adecuada diseñada especialmente para tal fin. Otra forma de obtener este alineamiento es químico en lugar de mecánico. Se basa en la adsorción de alcohol polivinílico (PVA) sobre la superficie del vidrio. El utilizado por nosotros ha sido Panreac, calidad RA, de dos grados de polimerización: 400 y 4.000. El más polimerizado da mejores orientaciones, aunque es más lenta su preparación. El método seguido consiste, esencialmente, en sumergir las muestras durante unos 5 minutos en una disolución al 2 % de PVA (saturada en el caso de PVA 4.000) calentada a 40–50°C. Una vez retiradas cuidadosamente, extrayéndolas en posición vertical y de forma que la dirección de alineamiento deseada sea perpendicular a la superficie del líquido, se dejan secar en dicha posición pasándolas, a continuación, un algodón en dicho sentido con el fin de acentuar el alineamiento de la capa de PVA adsorbida.

El alineamiento homeotrópico se realiza, únicamente, por métodos químicos. El tratamiento se realiza con una solución saturada de bromuro de hexadecil trimetil amonio (HTAB) en tolueno. Si la muestra se sumerge durante unos segundos en dicho líquido cuando está en ebullición, al ser extraída, y después de dejarla en posición vertical hasta que se seque, se consigue que las moléculas de HTAB fijen sus cabezas polares positivas sobre las imperfecciones del vidrio dejando sus cadenas no polares hacia el exterior. Con ello, las moléculas de cristal líquido que se depositen sobre ellas, adoptarán dicha orientación.

Una vez acondicionadas las superficies, las muestras deben de ser preparadas y rellenadas con cristal líquido de forma inmediata a fin de evitar alteraciones en ellas. Y para ello, la primera etapa es disponer los dos vidrios que constituirán la célula en una configuración paralela. Esto se consigue mediante unos espaciadores de Mylar cuyo espesor se conoce previamente y que será el que determine el espesor de la muestra. El conjunto se fija, bien por Parafilm, si se desea recuperar el cristal líquido, o bien con un adhesivo de cianocrilato (Loctite Super Glue 3) si se necesita una mayor rigidez en el conjunto. El interior se rellena mediante una micropipeta Pipetman 20, con un volumen prefijado de cristal líquido, el cual penetra por capilaridad en el interior de la muestra. Esta operación se facilita considerablemente si el material se encuentra en estado isotrópico.

Como última etapa es necesaria una comprobación de que la muestra obtenida cumple las condiciones requeridas. Por ello, en el caso de las células homogéneas, si éstas se colocan entre polarizadores cruzados, la muestra se ha de ver oscura cuando la dirección de la orientación de las moléculas coincida con la de polarización del polarizador o del analizador. En el caso de las torsionadas, los efectos deben de ser análogos, pero situando los polarizadores paralelos.

Las homeotrópicas planas, por el contrario, permanecen oscuras entre polarizadores cruzados independientemente de su posición relativa con respecto a éstos; en cambio, si se inclina ligeramente, dejando fijos los polarizadores, se puede observar la aparición de colores cuya tonalidad varía con la inclinación.

PROPIEDADES OPTICAS

Aunque el tema de las propiedades ópticas de los cristales líquidos es lo suficientemente amplio como para constituir por sí solo un artículo, daremos aquí algunas breves nociones del mismo con el único fin de aclarar algunos de los conceptos que se verán después. Y el primer hecho que hay que mencionar es el de que la mayor parte de dichas propiedades tienen su raíz en la fuerte anisotropía que ofrecen sus moléculas, y que fue levemente esbozado cuando se habló de su forma alargada. Gracias a esta anisotropía aparece el efecto de la birrefringencia. En la mayor parte de los cristales líquidos estudiados, se presentan dos índices de refracción, netamente diferenciados, que designaremos como n_o y n_e . El primero, n_o , es el índice de refracción del rayo ordinario, esto es, cuando el vector campo eléctrico asociado a la onda de la radiación luminosa que lo atraviesa, es normal al eje óptico de la molécula. Recordemos que el eje óptico de una molécula de cristal líquido es su eje de mayor longitud. El segundo, n_e , es el índice del rayo extraordinario, o sea, cuando el campo eléctrico es paralelo al eje óptico de la molécula. Una

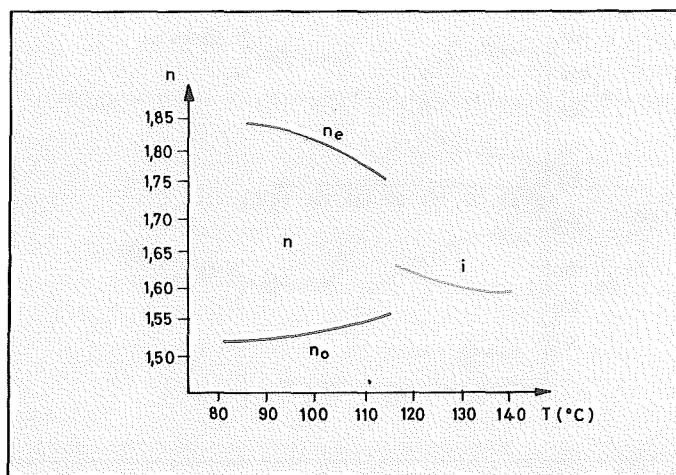


Figura 6. Comportamiento de los índices de refracción ordinario y extraordinario con la temperatura: n = nemático; i = isótropo.

representación genérica del comportamiento de ambos índices con la temperatura es la representada en la figura 6. Como puede apreciarse en la zona de birrefringencia, n_e decrece al aumentar la temperatura mientras que n_o crece ligeramente. El índice, n_i , en el punto de transición al isótropo (líquido) se corresponde con el índice medio calculado según la expresión $(2n_o + n_e)/3$.

Una consecuencia indirecta de la anterior anisotropía es la diferente absorción que presentan las moléculas según sea su posición con respecto a la luz que pasa por ella. Este nuevo efecto, de gran interés físico, ofrece de momento muy poco interés práctico, por lo que no nos detendremos más con él.

PROPIEDADES ELECTRICAS Y MAGNETICAS

Entramos ya, de lleno, en la base de los dispositivos basados en el empleo de cristales líquidos. La anisotropía de las moléculas vuelve a ser aquí el principal artífice de sus propiedades, tanto eléctricas como magnéticas. Como ya se

ha indicado en el caso de las ópticas, al ser la molécula alargada, sus propiedades difieren notoriamente según esté orientada con respecto a la perturbación externa que se introduzca. Así, en el caso de que se aplique un cierto campo eléctrico, se podrán encontrar dos diferentes permitividades dieléctricas. La obtenida según el eje principal de la molécula se designará por $\epsilon_{||}$ y la perpendicular por ϵ_{\perp} . En función de ellos puede definirse la anisotropía dieléctrica como $\Delta\epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$. Evidente, para hacer su medida será necesario, en la muestra tomada, que todas las moléculas estén orientadas de igual manera, esto es, que la muestra sea homogénea u homeotrópica. Es usual utilizar una configuración de condensador plano con una capa intermedia de cristal líquido (normalmente nemático o esméctico) de un espesor de alrededor de 100 micras. La construcción de esta célula puede hacerse según se ha visto en apartados anteriores.

Como es lógico, los valores de las constantes dieléctricas no son independientes de la temperatura tomada. En la figura 7 aparecen dos gráficas que dan el comportamiento

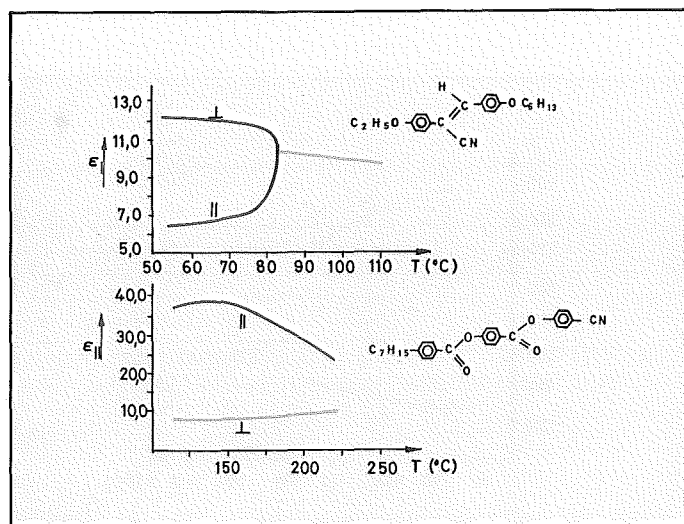


Figura 7. Variación de las constantes dieléctricas de dos cristales líquidos nemáticos con la temperatura.

en función de ella, para dos compuestos diferentes. En la figura 7a se muestra el caso de que $\epsilon_{||}$ es mayor que ϵ_{\perp} y en la figura 7b el contrario. Ambos casos son unos de los más extremos en lo que a anisotropía dieléctrica se refiere, ya que el primero de un valor de $\Delta\epsilon \approx 5$ y el segundo uno de $\Delta\epsilon \approx +30$. El primer tipo suele ser designado como cristal líquido negativo y el segundo como cristal líquido positivo. Sus propiedades difieren considerablemente, como se verá a continuación, siendo los positivos los más usados ya que dan lugar a los visualizadores comerciales.

Cuando un campo eléctrico se aplica a una muestra con un cristal líquido, sus moléculas responden de manera distinta según sea éste positivo o negativo. En el caso de los primeros, éstas tienden a alinearse según la dirección del campo, mientras que para los segundos, tienden a hacerlo perpendicular a él. Esta última situación aparece, además, perturbada por el hecho de que surgen una serie de inestabilidades hidrodinámicas que originan la aparición de un conjunto de fenómenos cuyo estudio dista aún bastante de estar concluido. El que el campo aplicado sea continuo o alterno conduce desde un punto de vista macroscópico a diferentes respuestas del cristal líquido. La frecuencia del

campo es pieza fundamental en la aparición de un tipo u otro de fenómeno. La mayor parte de estos fenómenos se derivan del hecho adicional de la anisotropía de la conductividad eléctrica que da lugar a una serie de movimientos de las partículas de impurezas, que siempre existen en toda muestra, de acuerdo con una serie de leyes más o menos conocidas. El resultado de todo ello, para una muestra de 100 micras de espesor, con cristal líquido negativo, aparece representado en la figura 8. En dicha figura se ha

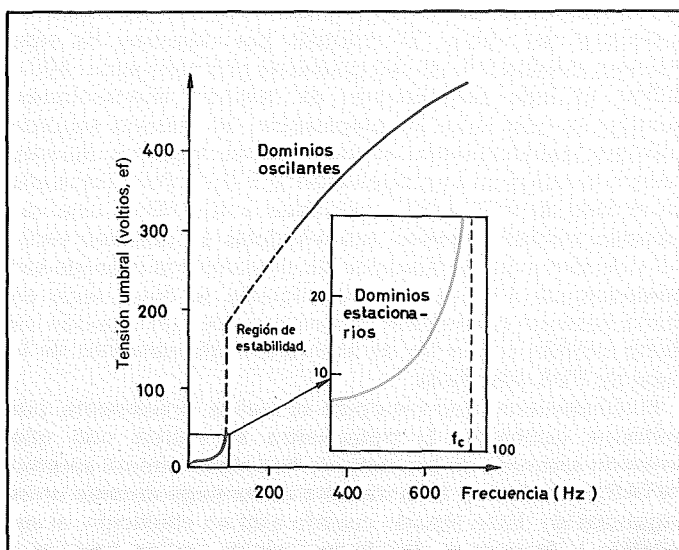


Figura 8. Comportamiento, para el MBBA, de la tensión aplicada en función de la frecuencia, para la obtención de los fenómenos que se detallan en el texto.

representado la tensión aplicada en función de la frecuencia. Como puede apreciarse aparecen una serie de zonas, claramente diferenciadas, en las que el comportamiento es muy distinto. Hay una frecuencia, F_c , denominada de corte, que separa las dos principales. En el caso presentado, esta frecuencia tiene un valor de unos 90 Hz. Para frecuencias inferiores, por ejemplo, para 0 Hz, a una tensión de unos 6 V se originan unas estriaciones en la célula, causadas por una ordenación periódica de las moléculas, que se denominan dominios de Williams.

Tensiones superiores hacen desaparecer a dichos dominios y se origina un fenómeno de turbulencia en el interior de la célula acompañada de una fuerte dispersión de la luz que hace que la muestra, que anteriormente era parcialmente traslúcida, pase a ser opaca. Este fenómeno, denominado «dispersión dinámica», ha sido utilizado, hasta 1975, aproximadamente, para la realización de los primeros visualizadores de cristal líquido. Estas unidades de presentación son lo que podríamos denominar «primera generación» de dispositivos electroópticos de presentación basados en cristales líquidos. Su principal inconveniente ha sido el de que al existir un movimiento de cargas aparece, asociado con él, un cierto gasto de energía, lo cual es una desventaja. De hecho, salvo en contadas ocasiones, no ha vuelto a ser empleado para visualizadores.

Finalmente, a frecuencias más altas, surge un nuevo tipo de dominios. Su aspecto es también el de estriaciones paralelas, pero con un espaciado entre una y otra mucho más pequeño que para los dominios de Williams, que si para éstos era del orden del espesor de la muestra, en el caso de los nuevos pasa a ser de unas pocas micras. Su tiempo de relajación, por otra parte, es también considerablemente

menor, siendo en éstos de unos pocos milisegundos y en los de Williams de décimas de segundo. Este tema será tratado en mayor extensión en el siguiente artículo, cuando se presenten los dispositivos existentes.

Por lo que respecta a la aplicación de campos magnéticos, la mayor parte de las consideraciones anteriores dadas para campos eléctricos, pueden aplicarse aquí. La única diferencia es que no se presentan cristales líquidos con anisotropía diamagnética negativa y sólo existen con positiva. Debido a ello, una molécula de cristal líquido siempre tenderá a orientarse según la dirección de campo magnético aplicado. Y también, debido a ello, no se presentan fenómenos del tipo de las inestabilidades electrohidrodinámicas que vimos antes. A pesar de ello, no es muy usual trabajar con estos campos. Los problemas derivados de su generación son lo suficientemente conocidos a todos para no necesitarse aquí insistir en ellos. Únicamente indicaremos que su interés primordial radica, aparte del científico, en su uso como alineadores de las moléculas. Cuando es precisa la seguridad de que una muestra esté perfectamente alineada, el campo magnético es la forma más fiable de proporcionarla.

APLICACIONES Y CONCLUSIONES

Una vez presentada una panorámica muy somera de aquellos aspectos, tanto físicos como químicos, que hemos estimado son necesarios para dar cuenta del funcionamiento de los diferentes dispositivos de cristales líquidos actualmente en uso o en estudio, sólo resta ofrecer una breve síntesis de cuáles son sus aplicaciones. Esta síntesis servirá de colofón justificativo de los anteriores apartados y de prólogo para los sucesivos. De hecho, aquí no pueden sino mencionarse las aplicaciones agrupadas en grandes bloques. Hasta el presente se han registrado varios cientos de patentes y se han publicado miles de artículos centrados en su uso posible o propuesto. Prácticamente, cada investigador o usuario de ellos, es capaz de sugerir varias docenas de previsible empleos. Pero, al mismo tiempo, sólo en contados casos han encontrado los cristales líquidos aplicaciones reales para dispositivos de producción en serie. En concreto, únicamente en el caso de los dispositivos electroópticos basados en nemáticos, su uso se ha generalizado de manera amplia. En el resto de los casos, es muy difícil prever cual puede ser el futuro.

A modo de resumen, la tabla 2 indica las principales áreas de aplicación de los cristales líquidos. En ella se señala, en su parte primera, el factor externo capaz de originar un cierto cambio sobre la configuración geométrica de sus moléculas, el campo de aplicación y el tipo de mesofase más usualmente empleado. En ella, en consecuencia, el cristal líquido es el objeto de la acción de un agente externo. En cambio, en la segunda parte de dicha tabla, se presenta el caso contrario, esto es, cuando el cristal líquido es un agente que afecta o ejerce una cierta acción sobre un determinado medio. Un cierto objeto de investigación puede verse alterado por la presencia de un determinado cristal líquido y modificar su comportamiento. Aunque esta tabla es reducida, cada una de sus partes lleva en su seno un gran número de casos particulares. Así, por ejemplo, y con el fin de aprovechar lo visto en este artículo, vamos a centrarnos en el cuarto apartado de la primera parte de la tabla 2. Y para ello veamos la tabla 3 que es su desarrollo.

Las aplicaciones técnicas de cualquier efecto incluido en la tabla 3 se basan en un esquema básico compuesto de tres etapas claramente diferenciadas. En cada una de ellas un

Parte 1: Cristal líquido como objeto de una acción externa		
Agente externo	Campo de aplicación	Tipo de mesofase
Temperatura	Termoindicadores Registro térmico de haz láser Filtros ópticos Holografía y visualización de radiaciones Detectores piroeléctricos Autoenfoco térmico de la luz Decoración y efectos artísticos	Col. Col.; EsA Col.; Nem. Col.; Nem. Es.C; Nem. Col.
Presión y otros agentes mecánicos	Dispositivos acustoópticos Visualización de flujos Piezodetectores Ensayos no destructivos de defectos cristalinos	Nem. Nem.; Col. Es.C. Nem.
Impurezas químicas	Análisis de mezcla de gases Investigación criminal	Col. Col.
Campo electro-magnético	Visualizadores electroópticos Moduladores y filtros ópticos controlados Dispositivos de procesado Fenómenos ópticos no lineales Visualización de fenómenos electrohidrodinámicos Ensayos no destructivos de circuitos eléctricos Electrofotografía Registro de imágenes	Nem.; Col.; Es. Nem.; Iso. Nem.; Col. Nem.; Col.; Es. Nem. Nem. Col. Col.
Parte 2: Cristal líquido como agente activo		
Tipo de acción	Campo de aplicación	Tipo de mesofase
Matriz orientadora	Fabricación de polarizadores Espectroscopia de absorción Espectroscopia NMR y ESR	Nem. Nem. Nem.; Es.A.
Solvente anisótropo	Separación de isómeros ópticos Tecnología de polímeros Fotoquímica	Col. Nem.; Lio Nem.
Abreviaturas: Nem (nemáticos); Col (colestéricos); Es (esmécticos); EsA (esmécticos tipo A); EsC (esmécticos tipo C); Iso (isótropos); Lio (liotrópicos).		

Tabla 2. Áreas de aplicación de los cristales líquidos.

cierto conjunto de los parámetros físicos del sistema es el que desempeña el papel protagonista. Las tres etapas son las siguientes:

- a) Es necesario, en primer lugar, que exista la posibilidad de un acoplo suficientemente intenso entre un campo externo y la muestra. El papel importante lo desempeña aquí la fuerte anisotropía de los parámetros electromagnéticos del cristal líquido, o sea, la anisotropía dieléctrica y la magnética, así como la de la conductividad eléctrica.
- b) Es necesario, además, que las moléculas del cristal líquido tengan una cierta libertad para cambiar su orientación, o dicho de otra manera, para que su director se mueva. Este proceso viene controlado por los parámetros viscoso-elásticos de la sustancia y de las condiciones de contorno.
- c) Finalmente, es necesario controlar cómo se han movido las moléculas de acuerdo con los dos condicionantes de las dos etapas anteriores. Y aquí entra en escena la

<i>Factor específico de la acción</i>	<i>Efecto</i>	<i>Tipo de me- sofase</i>
Campo magnético cuasiestático	Transición de Freedericksz Efecto Cotton-Mouton Anulación de la hélice colestérica Cambios de textura	Nem. Iso Col. Col.; EsC
Campo eléctrico cuasiestático	Transición de Freedericksz Efecto Kerr Efecto Flexoelectrónico Anulación de la hélice colestérica Efecto lineal electroóptico Cambios de textura	Nem. Iso Nem.; EsA; Iso Col. EsC Col.; EsC
Campo electromagnético de alta frecuencia	Efecto Kerr óptico Generación de armónicos ópticos Autoenfoco de luz Transición Nem → Col	Iso EsC; Col. Nem.; EsC Nem.
Corriente eléctrica	Inestabilidades electrohidrodinámicas Dispersión dinámica de la luz Cambio de texturas (efecto de memoria)	Nem.; Iso; Col. EsC Nem. Col.; EsC

Tabla 3. Efectos de la interacción de los cristales líquidos con campos electromagnéticos.

anisotropía óptica del material y, en concreto, de sus índices de refracción y de sus coeficientes de absorción. De lo anterior queda justificado el estudio que se ha presentado en el presente artículo. En los dos siguientes nos limitaremos a hacer uso de lo expuesto. ●

En el tercer artículo de esta serie aparecerá la bibliografía más significativa sobre el tema.

José Antonio Martín Pereda. Ingeniero de Telecomunicación y Licenciado en Ciencias Físicas en junio de 1967. Realizó los estudios de doctorado en el Departamento de Física, en el Grupo de Electrónica Cuántica, de la Colorado State University de Fort Collins, Colorado, de 1968 a 1971. Doctor Ingeniero de Telecomunicación en junio de 1971. Catedrático y Director del Departamento de Tecnología Electrónica y Electrónica Cuántica de la E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación, de Madrid, desde Diciembre de 1975. En la actualidad es Vicerrector de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Ha publicado artículos y presentado ponencias en un gran número de Congresos Internacionales, casi todos ellos basados en el estudio de los cristales líquidos como medios electro-ópticos para modulación y deflexión y en sus posibles aplicaciones dentro del campo de las Comunicaciones Ópticas.

Miguel Angel Muriel Fernández. Ingeniero de Telecomunicación en junio de 1978. Doctor Ingeniero de Telecomunicación en julio de 1980. La Tesis Doctoral presentada, que tuvo como objeto el estudio de las deflexiones transversales de luz mediante cristales líquidos, obtuvo el Premio a la mejor Tesis Doctoral convocado por el Colegio y la Asociación de Ingenieros de Telecomunicación en septiembre de 1980.

Ha publicado y participado en varios Congresos Nacionales e Internacionales con temas derivados de sus trabajos sobre cristales líquidos. En la actualidad es Profesor Adjunto de la Cátedra de «Tecnología Electrónica y Electrónica Cuántica», de la E.T.S.I.T. de Madrid.

José Manuel Otón Sánchez. Licenciado en Ciencias Químicas por la Universidad de Murcia en 1973. Doctor en Química por la Universidad Complutense de Madrid en 1976. Ha trabajado en investigación en distintos campos de la Química Física en el Instituto «Rocasolano» del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y en el Departamento de Química de la Universidad de Maryland (USA). Actualmente es Catedrático Interino de Química de la E.T.S.I.T. de Madrid.